

# 棋盘式纸浆模塑制品结构性能计算机仿真与实验研究

徐弘, 帅大平, 邓瑶瑶

(湖南工业大学, 株洲 412007)

**摘要:** 基于传统的纸浆模塑制品结构在运输中的性能瓶颈, 尝试了把棋盘式结构形式应用于纸浆模塑制品结构中。主要通过应用计算机模拟和实验验证, 研究了棋盘式纸浆模塑制品结构的优越承载性能和抗振性能。研究发现, 棋盘式结构在所用材料量较传统结构减少的情况下, 承载能力提升 5 倍以上, 承载能力可达到 150 kg, 并且具有优越的低频抗振性能。

**关键词:** 纸浆模塑; 棋盘式结构; 计算机模拟; 承载性能; 抗振性能

**中图分类号:** TB484.1; TB482 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2011)11-0029-05

## Simulation and Experimental Investigation on Structural Performance of Chessboard Type Molded Pulp Products

XU Hong, SHUAI Da-ping, DENG Yao-yao

(Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** Chessboard structure was tried to apply to molded pulp products to solve the bottleneck situation of conventional molded pulp configuration. The superior performance of chessboard structure of molded pulp product was studied through computer simulation and experimental verification. It was founded that the materials required for chessboard structure are less than the traditional one; the carrying capacity is 5 times more than the traditional one, up to 150 kg; moreover, it has the excellent low-frequency vibration resistance.

**Key words:** molded pulp; chessboard structure; computer simulation; carrying capacity; vibration resistance

纸浆是环保材料且可以循环使用, 以纸浆为原料, 模塑为工艺的制品结构, 广泛应用于运输包装领域。纸浆模塑制品结构代替非环保的发泡型材料的缓冲衬垫结构是一种必然趋势<sup>[1]</sup>。目前传统的纸浆模塑制品结构承载能力非常有限, 因此提出了纸浆模塑制品的棋盘式结构, 目的是使其有较强的承载能力。棋盘式结构的力学性能、定义和其纸浆模塑制品生产制作, 见文献[2]。

### 1 承载性能仿真分析

包装制品承载能力的大小为结构失稳时的承载力。包装容器拐角处的应力值比其它部位大很多, 拐角处的应力如果超过了材料的塑性阶段的应力临界值, 不能认为它就失稳了, 因为拐角处应力集中的问题, 国际 ASME 组织给出了仿真分析的评定标准: 尖

角处或者局部集中的应力容许值可以是屈服强度的 3~4 倍<sup>[3]</sup>。

#### 1.1 材料属性与网格划分

纸浆模塑材料属性大致经历 2 个阶段: 线弹性阶段和塑性阶段, 见图 1。

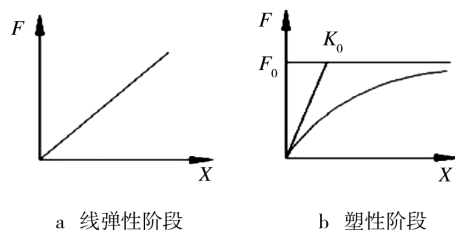


图 1 纸浆材料属性

Fig. 1 Property of pulp material

纸浆模塑材料塑性阶段的特点与双曲正切型材料类似<sup>[4]</sup>, 如果知道屈服时的承载力, 就能算出失稳时的承载力, 双曲正切型材料取屈服值的 1.4 倍左右

收稿日期: 2011-04-08

作者简介: 徐弘(1963—), 男, 湖南人, 硕士, 湖南工业大学高级工程师, 主要研究方向为快速成形、纸塑包装和纸塑模具。

为材料失稳时的承载力。纸浆模塑制品结构对力学性能的要求不同于已经成熟的金属材料加工精确,为便于仿真计算,定义材料为线弹性材料,估算结构破坏时的承载力。

制浆材料的配比不同,纸浆属性将有差异。纸浆模塑材料的弹性模量通过万能材料试验机测得,其它数据参考平幼妹等人的学术资料<sup>[5-6]</sup>,密度由青岛汇宇纸塑包装有限公司提供,见表 1。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /MPa	泊松比	抗剪模量 /MPa	屈服强度 /MPa
黄浆	320	52.5	0.015	0.075	0.5

考虑到便于实验测量与有限元分析,设计的棋盘式结构模型见图 2。

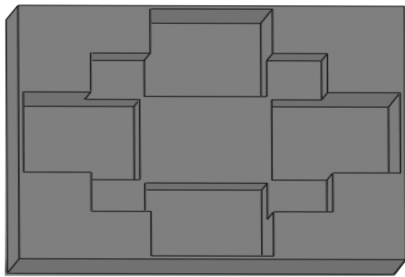


图 2 棋盘式结构模型

Fig. 2 Chessboard structure

设置材料属性并选择 SOLID45 单元。由于结构对称,对 1/4 模型作网格划分,拐角处再次细分网格。共生成 27 615 个单元,37 200 个节点,见图 3。

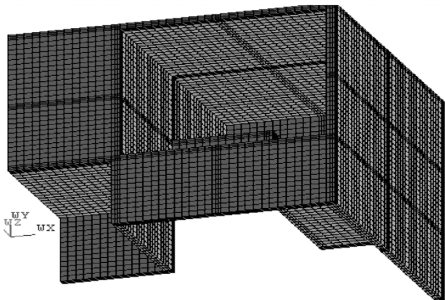


图 3 棋盘式结构 1/4 有限元模型

Fig. 3 Quadrant finite element model of chessboard structure

## 1.2 边界约束与加载求解

1/4 模型除了承载面法向方向底端需要约束外,

剖面也施加对称约束。1/4 承载面上进行加载求解,载荷力为仿真计算多次试验加载之后的试验值,当力加载至 1 120 N 时,起关键承载能力的侧壁应力达到了失稳时的应力值。底部应力云图见图 4,侧壁

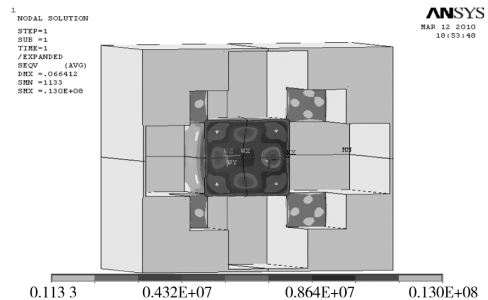


图 4 底部应力云图

Fig. 4 Stress contour

的应力云图见图 5。应力大小在 0.44~0.7 MPa 范围

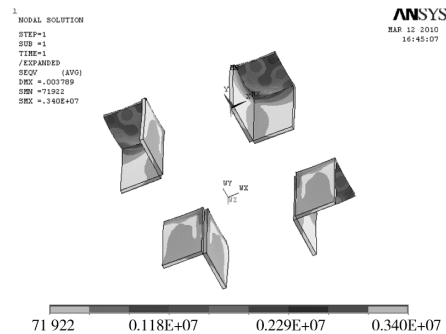


图 5 侧壁应力云图

Fig. 5 Stress contour of side wall

内,侧壁拐角处大约为 2.2 MPa。也就是计算机模拟测得的棋盘式结构的承载能力值大约为 1 120 N。

常规的托包模型(见图 6 和 7)在相同条件下

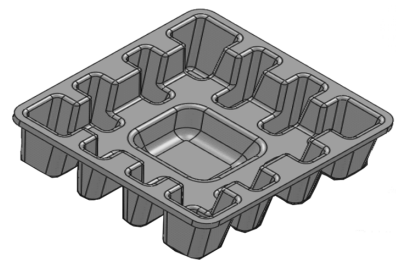


图 6 托包结构

Fig. 6 Tray structure

(1 120 N)的载荷分析表明,结构失稳严重,且应力主要分布在 8.0~10 MPa 之间。当载荷力设置为 200 N 的时候,应力状况才与棋盘式结构应力状况相似。

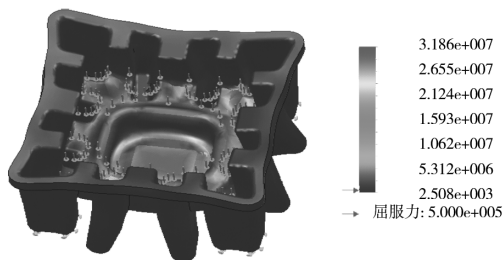


图7 托包结构应力云图分析

Fig. 7 Stress contour analysis of tray structure

常规设计的缓冲单元有 13 个,而棋盘式结构缓冲单元只有 9 个,棋盘式结构的承载能力是常规设计承载能力的 5 倍以上,优势非常明显。

仿真分析模型是理想化模型,没有圆角化,圆角化后的模型承载能力更强。

## 2 棋盘式制品结构静态压缩试验

参照 GB 4857.4-84,结合纸浆模塑制品的实际情况进行试验。测量仪器为 WDJ-W 微控电子万能试验机,试样为 9 型腔的棋盘式结构。其整体尺寸为:180 mm×180 mm×90 mm,材料厚度为 2.7 mm,密度为 325 kg/m<sup>3</sup>,环境温度为 22 ℃,湿度为 55%。棋盘式结构静态压缩测试系统原理<sup>[8]</sup>见图 8,上板缓慢加载,控制加载速度为(5±2)mm/min。

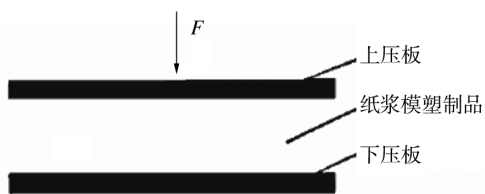


图8 静态测试实验

Fig. 8 Schematic diagram of static test

选取 3 个试样进行测定,取平均值,结果见图 9。

从图 9 可知,在压缩过程开始阶段(0~200 N),纤维之间比较松散;载荷大于 200 N 后,斜率较大,到 1 800 N 后基本成直线,这是良好的线弹性段;1 800~2 110 N 阶段结构处于塑性阶段;2 110 N 时结构损坏,损坏后承载能力并没有急剧下降。与仿真分析相比,试验取得的最大承载力大于仿真值 1 120 N,试验值更加理想。

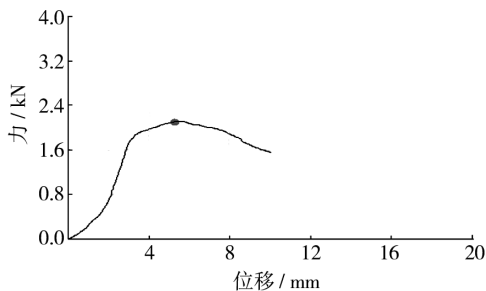


图9 力-位移曲线

Fig. 9 Force-displacement curve

## 3 棋盘式结构 ANSYS 模态分析

包装件在运输过程中,可能受到汽车、火车、轮船和飞机等路况频率的激励,这类激励就是包装件的振动环境,是产生振动的原动力。引用部分路况频率<sup>[8]</sup>:汽车运输时路况共振频率一般低于 25 Hz;火车运输包装的共振基频一般小于 15 Hz;在空运中,起飞滑行阶段,其频率通常在 15~100 Hz,在稳定飞行阶段,其频率为 100~1 000 Hz;在海运中,海浪引发的低频振动为 0.03~0.2 Hz,对货物的共振影响不大,大风暴的时候,振动频率在 50~100 Hz,对货物的影响较大。如果棋盘式纸浆模塑结构的固有频率能避开路基频率,即大于 25 Hz,用汽车和火车运输比较理想。

ANSYS 模态分析的过程包括 4 个步骤:

1) 建立 ANSYS 模型,施加约束,模型见图 10 和 11。

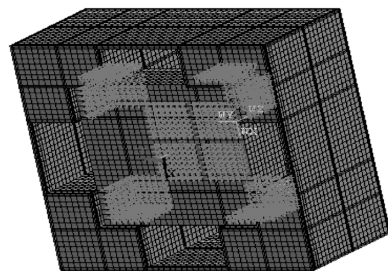


图10 货物与结构耦合的 ANSYS 模型

Fig. 10 ANSYS model of goods and mold couple

2) 加载及求解。定义分析类型和分析选项,施加载荷,采用提取分块法(Block lancezos 法)进行固有频率的有限元计算,这种默认的求解方法适用于由

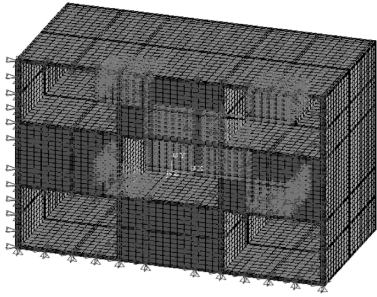


图 11 载荷约束

Fig. 11 Loads and constraints smold

壳或壳与实体组成的模型。

3) 扩展模态。将振型写入结果文件,将模态扩展为 10 阶,见表 2。

表 2 10 阶模态的频率

Tab.2 First ten modes of vibration

模态	1	2	3	4	5
频率/Hz	38.73	39.24	39.244	91.43	95.654
模态	6	7	8	9	10
频率/Hz	95.65	165.65	169.15	169.15	178.9

4) 后处理。经过扩展模态后,模态分析的结果,包括固有频率、扩展的模态振型、相对应力和力分布,将被写入到结构分析结果文件中,见图 12。

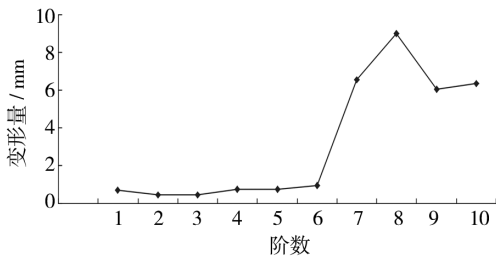


图 12 10 阶模态的变形

Fig. 12 Deformations corresponding to first ten mode shapes analysis on steps

从 10 阶模态看,基频 38.733 Hz 能避免汽车和火车运输过程产生的低频共振。1 阶模态的变形见图 13,对于飞机和海洋风暴产生的高频振动,棋盘式纸浆模塑结构容易产生共振,且变形量大,因此纸浆模塑适合陆运和无风暴的海运,不适合空运。从产品的结构来看,棋盘式结构侧壁正中间变形明显,是共振产生时的薄弱环节。在生成时可以通过增加厚度或工艺调整的办法,增加侧壁的抗振强度。ANSYS 分析表明,侧壁正中间厚度增加到 5 mm(传统的工艺

为 3 mm)时,达到了结构优化的目的。

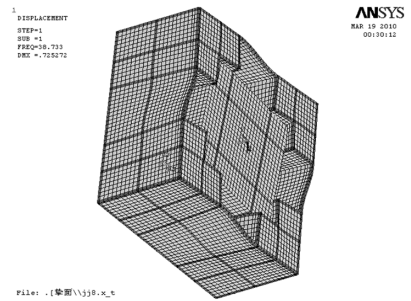


图 13 1 阶模态的变形

Fig. 13 Deformation for first mode shape

## 4 变频振动测试实验

虽运输过程的振动频率是随机的,但运输工具与运输路况组成的系统受到的振动是有频率范围的。正弦变频测试试验的目的是寻找包装件的共振频率,并考察包装件在一定频率范围内的抗振性能。

参照 GB 4857.10—86 进行<sup>[9]</sup>。在包装品内镶不同重量的货物,固定后测出其共振频率和抗振性能。试样整体尺寸为:180 mm×180 mm×90 mm,材料厚度为 2.7 mm,密度为 320 g/cm<sup>3</sup>。内镶块(货物)为与仿真实验质量相当的厚树脂板。振动仪器是台湾 KING DESIGN 生产的电磁式高频振动试验机,见图 14。



图 14 电磁式高频振动试验机

Fig. 14 High-frequency electromagnetic vibration table

试验时将包装件或产品放在振动台上,让振动台在规定的频率范围内,以一定的扫频速度进行扫频振动。在产品上安装加速度计,测量产品的响应加速度,绘制包装件频率特性曲线,其中振动传递率最大处对应的频率即包装件的共振频率。包装件的共振频率往往不止一个,在最大峰值处为主共振点,其次

的峰值处为第二共振点,依次类推。

通过 ANSYS 仿真谐振动分析发现:频率在 90~100 Hz 频率情况下,产品结构因振动产生的应力变化非常显著。在 1~200 Hz 范围进行变频振动试验,得到了加速度与频率响应的关系,见图 15。从图 15

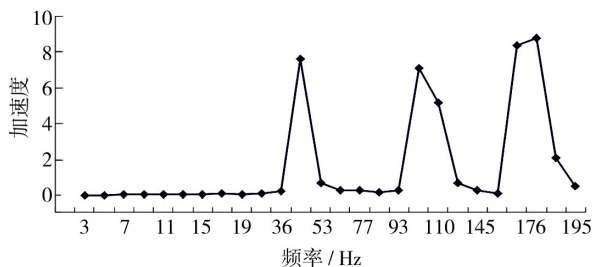


图 15 频率-加速度响应关系曲线

Fig. 15 Frequency-acceleration response curve

看出,振动实验结果与仿真实验结果基本吻合。其中频率在 30~40 Hz, 90~100 Hz, 以及 160~180 Hz 时,响应加速度较大,产生了共振。

## 5 结论

棋盘式纸浆模塑结构承载能力是传统结构的 5 倍以上,所用材料较传统设计结构要少。从试验静态载荷分析看,承载能力达到了 2 110 N,突破了传统结构只能承载 150 kg 以下商品的局限。棋盘式结构可

以避免运输过程中的共振,即使在低频区共振产生时,也具有很好的抗振效果。

### 参考文献:

- [1] 朱小东,张孝徽. 纸浆模塑技术的发展及其模具的革新[J]. 株洲工学院学报, 2002(1): 1-3.
- [2] 邓瑶瑶,徐弘,帅大平,等. 应用 Solidworks 对棋盘式纸浆模塑结构及其模具的设计[J]. 包装学报, 2010(2): 43-47.
- [3] 李建国. 压力容器设计的力学基础及其标准应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [4] 黄俊彦. 纸浆模塑生产实用技术[M]. 北京:印刷工业出版社, 2007.
- [5] 平幼妹,余本农,计宏伟,等. 用有限元分析和 DICM 确定纸浆模塑材料弹性常数的逆问题[J]. 包装工程, 2006, 27(1): 24-27.
- [6] 计宏伟,余本农,平幼妹,等. 用数字相关测量方法研究纸浆模塑材料拉伸时的力学性能[J]. 包装工程, 2004, 25(4): 168-170.
- [7] GB 4857. 4-84, 中华人民共和国国家标准——测量与试验[S].
- [8] 彭国勋,宋宝丰. 物流运输包装设计[M]. 北京:印刷工业出版社, 2006.
- [9] 刘晓晖. 人车路系统振动的时域控制模拟及其频谱分析[D]. 长沙:湖南大学, 2008.
- [10] GB 4857. 10-86, 中华人民共和国国家标准——测量与试验[S].

(上接第 28 页)

基础上,选择较小的  $\gamma$  作为瓦楞辊的设计参数,这样既可以降低生产成本又可以满足国标基本要求。

3) 为了高质量地满足部分特殊要求,尤其是针对瓦楞纸板(箱)物理性能的特殊要求,生产企业应该先打样测试后再批量生产;或者通过日常生产积累不同材料瓦楞纸板的物理指标测量结果,建立数据库,当客户提出特定要求时,可以通过改变材料弥补压楞系数  $\gamma$  带来的影响。

### 参考文献:

- [1] 中国包装联合会纸制品包装委员会. 全球瓦楞纸箱印刷成套设备市场行业发展现状[N]. 中国包装报, 2011-02-10(1).

- [2] GB/T 6544-2008, 瓦楞纸板国家标准[S].
- [3] 杨瑞丰. 瓦楞纸箱生产实用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
- [4] 赵亮. 基于有限元的瓦楞纸板楞型研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009.
- [5] 邵卫东. 瓦楞辊楞型参数对纸箱厂生产成本的影响[J]. 纸包装工业, 2009(5): 79-80.
- [6] 柯晖,周世棠,魏春梅,等. 单面瓦楞机高速瓦楞辊齿形参数的优化设计[J]. 包装工程, 2000, 21(2): 30-33.
- [7] 程锡潘. 瓦楞成型及有关瓦楞辊设计问题[J]. 包装与食品机械, 1985(4): 11-15.
- [8] 郑开陆. 瓦楞辊再生的研究[J]. 包装工程, 2006, 27(2): 34-36.